

Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga

Comparative study of different techniques on the flexural strengthening of reinforced concrete beams using CFRP's under monotonic and fatigue loading

Mário Coelho

Mestre/Aluno de Doutoramento
Universidade do Minho, ISISE – Departamento de Engenharia Civil
Guimarães
mcoelho@civil.uminho.pt

Luís Silva

Mestre
Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil
Guimarães
luis_t_silva@hotmail.com

José Sena Cruz

Doutor/Professor Auxiliar
Universidade do Minho, ISISE – Departamento de Engenharia Civil
Guimarães
jsena@civil.uminho.pt

Joaquim Barros

Doutor/Professor Associado
Universidade do Minho, ISISE – Departamento de Engenharia Civil
Guimarães
barros@civil.uminho.pt

Resumo

A aplicação de polímeros reforçados com fibras (FRP) no reforço à flexão de estruturas de betão armado (BA) tem sido realizada, essencialmente, com recurso às técnicas de colagem externa de mantas ou faixas de laminado (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR) e de inserção de laminados ou varões no betão de recobrimento (*Near-Surface Mounted* – NSM). No âmbito do projeto em que este trabalho se insere pretende-se avaliar as potencialidades de uma técnica de reforço que consiste em, simultaneamente, colar e ancorar laminados multidireccionais de fibras de carbono na superfície de elementos de BA (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement* – MF-EBR). No presente trabalho apresentam-se e analisam-se os resultados de um programa de ensaios monotónicos e de fadiga realizado em vigas de BA reforçadas com laminados de CFRP segundo as técnicas EBR, NSM e MF-EBR. Adicionalmente, são também apresentados e analisados os resultados da simulação numérica dos ensaios monotónicos efetuados.

Palavras-chave: CFRP; EBR; NSM; MF-EBR; Fadiga

Abstract

The application of fiber reinforced polymers (FRP) in the flexural strengthening of reinforced concrete structures has been conducted mainly using the techniques of externally bonded fabrics or laminate strips (*Externally Bonded Reinforcement* - EBR), and insertion of strips or rods in the concrete cover (*Near-Surface Mounted* - NSM). In the context of the research project in which this work is part, the potentialities of a strengthening technique, that consists of, simultaneously, gluing and anchoring multidirectional carbon fiber laminates on the surface of reinforced concrete elements (*Mechanically fastened and Externally Bonded Reinforcement* - MF-EBR), are explored. In this paper the results of a monotonic and fatigue test program with concrete beams reinforced with CFRP laminates applied according to the EBR, NSM and MF-EBR techniques are presented and analyzed. In addition, numerical simulations of the monotonic tests are presented and discussed.

Keywords: CFRP; Fatigue; EBR; NSM; MF-EBR

1 Introdução

No atual panorama de crise, o setor da construção tem vindo a enfrentar dificuldades de negócio, procurando cada vez mais novas oportunidades noutras áreas emergentes, como é o caso da reabilitação do parque habitacional construído. Por outro lado, a existência de estruturas com mais de 40 anos, construídas com poucos ou nenhuns cuidados em relação a alguns dos aspetos, que à luz da regulamentação actual são exigidos, nomeadamente em relação à acção sísmica, conduz à mesma necessidade de reforço e/ou reabilitação.

Neste contexto existem já diversos sistemas/técnicas de reforço devidamente documentados, e outros que, embora já venham sendo aplicados, ainda se encontram em fase de desenvolvimento. Um destes sistemas consiste na aplicação de polímeros reforçados com fibras (*fiber reinforced polymer* – FRP) na reabilitação de estruturas de BA. A elevada rigidez e resistência à tração, baixo peso, bom comportamento à fadiga, imunidade à corrosão e a versatilidade geométrica dos FRP's faz destes uma boa alternativa aos sistemas de reforço tradicionais, como é o caso do encamisamento em betão armado ou a aplicação de chapas metálicas, entre outros.

Os FRP's têm vindo a ser aplicados, principalmente, com recurso a duas técnicas de reforço [1]: a colagem externa de mantas ou faixas de laminado (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR) e a inserção de laminados ou varões no betão de recobrimento (*Near-Surface Mounted* – NSM) do elemento estrutural a reforçar.

A técnica EBR foi a primeira a aparecer e tem-se mostrado como sendo de execução relativamente simples e rápida, conseguindo-se aumentar a capacidade de carga e a rigidez dos elementos a reforçar. As principais desvantagens desta técnica estão relacionadas com o facto de o material de reforço (FRP) ficar localizado à superfície, ficando assim vulnerável à sua degradação, principalmente, devido às condições ambientais, como incêndios, temperaturas elevadas, radiação UV, humidade ou até mesmo aos atos de vandalismo.

Em alternativa surgiu a técnica NSM que, em comparação com a anterior, apresenta diversas vantagens como [2]: menor quantidade de trabalho local na preparação da superfície e na instalação dos elementos de reforço, ausência de preocupações com as irregularidades da superfície do betão, a remoção e/ou tratamento da camada superficial do betão deixa de ser necessária, o reforço de FRP está protegido pelo

betão de recobrimento (menos exposto aos agentes agressivos) e, finalmente, a estética da estrutura reforçada mantém-se praticamente inalterada.

Vários estudos, no entanto, têm demonstrado a ocorrência frequente de modos de rotura frágeis, nomeadamente, destacamento do FRP no caso da técnica EBR, e desintegração do betão de recobrimento no caso da técnica NSM. Para além de apresentarem modos de rotura frágeis, o material de reforço aplicado segundo estas técnicas não é eficientemente explorado, uma vez que a tensão máxima instalada no FRP aquando da rotura do elemento reforçado é muito menor que a sua resistência à tração. Para resolver o problema do destacamento prematuro do reforço de FRP têm sido aplicados sistemas de ancoragem nas extremidades do mesmo, com recurso a chapas metálicas aparafusadas e/ou mantas de FRP coladas.

Mais recentemente surgiu uma técnica de reforço alternativa às anteriores, a qual recorre a laminados multidireccionais híbridos com fibras de vidro e de carbono apenas ancorados com parafusos metálicos à superfície do elemento de betão a reforçar (*Mechanically Fastened* – MF-FRP) [3;4]. A principal vantagem desta técnica de reforço deve-se ao facto de que o sistema de ancoragem, sendo distribuído ao longo do reforço de FRP, ajuda a desenvolver maiores tensões em toda a sua extensão, diminuindo a concentração de tensões e aumentando a resistência da ligação [5]. A aplicação da técnica MF-FRP no reforço à flexão de elementos de BA melhora o comportamento à flexão, com pouca ou nenhuma perda de ductilidade [6]. Na última década, têm sido realizados muitos trabalhos com o objetivo de estudar esta técnica, sendo apontadas diversas vantagens, nomeadamente, a instalação rápida e simples com recurso a ferramentas manuais sem necessidade de competências laborais especiais, a não necessidade de preparação da superfície e a imediata possibilidade de utilizar a estrutura reforçada após a instalação do FRP [3;4;6-14]. No entanto, também têm sido observadas algumas desvantagens deste sistema, nomeadamente fissuras induzidas pelo impacto dos elementos de fixação em betões de maior resistência e transferência de tensões menos eficaz entre o FRP e o betão devido ao facto dos pontos de fixação serem discretos [15].

Tendo por base as técnicas EBR e MF-FRP, neste trabalho apresenta-se uma técnica de reforço com FRP's que consiste em, simultaneamente, colar e aparafusar laminados multidireccionais de CFRP no elemento de BA a reforçar (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement* – MF-EBR). A técnica MF-EBR combina as ancoragens da técnica MF-FRP com as propriedades da colagem externa da técnica EBR. Além disso, as ancoragens são pré-esforçadas e o laminado multidireccional utilizado foi desenvolvido exclusivamente com carbono (*multidirectional laminate of CFRP* – MDL-CFRP) para apresentar elevados níveis de eficácia. O MDL-CFRP tem elevada resistência à tração longitudinal, módulo de elasticidade e resistência ao esmagamento localizado (devido às ancoragens) [16].

A fim de avaliar a eficiência das técnicas EBR, NSM e MF-EBR, foram realizados ensaios de flexão sob quatro pontos de carga com vigas de BA sob carregamento monotónico e de fadiga. No presente trabalho os ensaios são descritos e os resultados são apresentados e discutidos em detalhe. Realizaram-se simulações numéricas dos ensaios monotónicos com o intuito de avaliar a capacidade dos atuais instrumentos computacionais, que recorrem a métodos de elementos finitos (MEF), na simulação do comportamento de elementos reforçados segundo estas técnicas. Apresentam-se e discutem-se os principais resultados das simulações efetuadas.

2 Programa Experimental

2.1 Provetes e configuração de ensaio

O programa experimental definido consistiu em duas séries de quatro vigas de BA, sendo uma destinada a ensaios monotónicos e a outra para ensaios de fadiga. Cada série tinha uma viga de referência (REF) e três vigas reforçadas de acordo com cada uma das técnicas de reforço em estudo, nomeadamente, EBR, NSM e MF-EBR. No presente trabalho cada viga será designada pela técnica de reforço aplicada. As vigas de BA tinham uma secção transversal de 200 mm de largura por 300 mm de altura e distância entre apoios de 2000 mm. A armadura de flexão era constituída por 3Ø10 junto à face inferior e 2Ø10 junto à face superior. A armadura transversal era materializada por estribos de 6 mm de diâmetro com um espaçamento constante de 100 mm de modo a prevenir a rotura prematura por corte das vigas. Na Figura 1 apresenta-se a secção transversal da viga de referência e na Figura 2 a das vigas reforçadas.

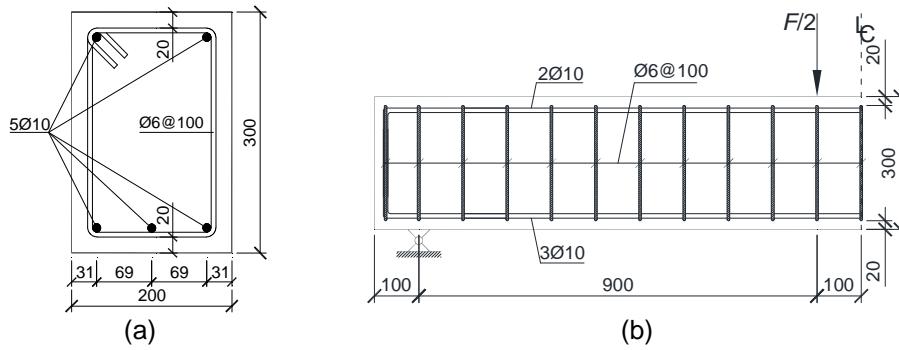


Figura 1 – Vigas de BA: (a) secção transversal; (b) vista longitudinal. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

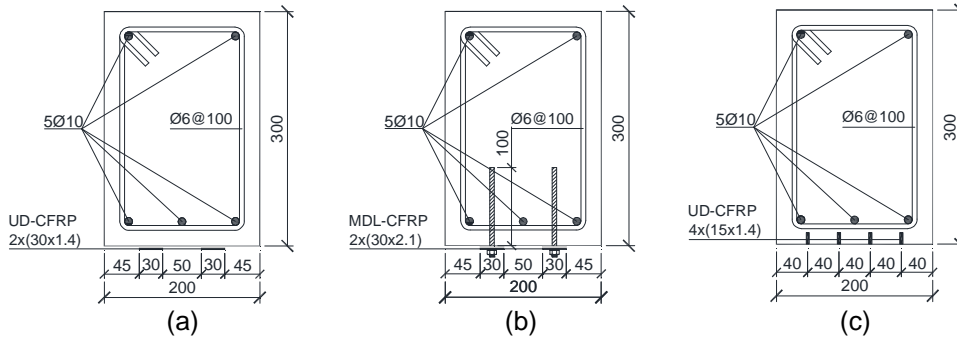


Figura 2 – Secção transversal das vigas reforçadas: (a) EBR; (b) MF-EBR; (c) NSM. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Na Tabela 1 apresentam-se as principais características das vigas. Nesta tabela t_f , L_f e w_f são a espessura, o comprimento e a largura dos laminados, respetivamente, e $\rho_{s,eq}$ é a percentagem equivalente de armadura longitudinal definida de acordo com a equação (1):

$$\rho_{s,eq} = \frac{A_s}{bd_s} + \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{A_f}{bd_f} \quad (1)$$

Nesta equação, b é a largura da viga, A_s e A_f são a área das secções transversais da armadura longitudinal de tração e do FRP, respetivamente, E_s e E_f são os módulos de elasticidade do aço e do FRP, respetivamente, e d_s e d_f são as distâncias desde a face superior da viga e o centro de gravidade da armadura de tração longitudinal e do FRP, respetivamente. Procurou aplicar-se um valor idêntico de $\rho_{s,eq}$ em todas as vigas reforçadas.

Tabela 1 – Propriedades das vigas.

| Viga | Tipo de laminado | N.º de laminados | t_f [mm] | L_f [mm] | w_f [mm] | $\rho_{s,eq}$ [%] |
|--------|------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| REF | - | - | - | - | - | 0.439 |
| EBR | Unidireccional | 2 | 1.41 | 1400 | 30 | 0.550 |
| MF-EBR | Multidireccional | 2 | 2.07 | 1400 | 30 | 0.553 |
| NSM | Unidireccional | 4 | 1.41 | 1400 | 15 | 0.561 |

Para a realização dos ensaios foi adoptado um sistema de quatro pontos de carga em ambas as séries (monotónica e de fadiga), como se ilustra na Figura 3a.

Os ensaios monotónicos foram realizados com recurso a um servo-actuador hidráulico sob controlo de deslocamento, a uma velocidade de 20 $\mu\text{m/s}$, pelo transdutor de deslocamento (LVDT) localizado a meio vão da viga (LVDT3 na Figura 3). A força foi aplicada com um actuador cuja célula de carga acoplada ao mesmo tinha 500 kN de capacidade de carga.

Os ensaios de fadiga foram realizados entre dois níveis de carga mínimo e máximo, $S_{min}=25\%$ e $S_{max}=55\%$, respetivamente, sendo S o rácio entre a carga aplicada e a máxima capacidade de carga da correspondente viga monotónica, F_m . De acordo com [1], após um milhão de ciclos a resistência à fadiga de um CFRP situa-se entre os 60 e 70% da sua resistência inicial. Adicionalmente, no caso das presentes vigas, o início da cedência das armaduras ocorre para um valor próximo de $S_{max}=60\%$. Por estes motivos, adoptou-se $S_{max}=55\%$. O valor de S_{min} foi definido tendo por base a máxima amplitude de deslocamentos permitida pelo equipamento servo-controlado, para uma frequência de 2 Hz.

Os ensaios de fadiga foram realizados em três etapas: inicialmente foi aplicado um carregamento monotónico em controlo de força (100 N/s) até $S_{max} \times F_m$ de modo a poder registar-se a resposta inicial da viga; depois foi imposto um milhão de ciclos entre os níveis $S_{min} \times F_m$ e $S_{max} \times F_m$ a uma frequência de 2 Hz; por último, repetia-se o carregamento monotónico, desta vez até à rotura da viga.

Para além do LVDT3 já referido, foram usados mais quatro LVDT's para registar a deformação nas secções carregadas (LVDT2 e LVDT4) e nas secções coincidentes com as extremidades do reforço de FRP (LVDT1 e LVDT5) – ver Figura 3a. Foram também utilizados extensómetros eléctricos para monitorizar as extensões da armadura e do FRP durante o ensaio – ver Figura 3b-e.

2.2 Caracterização dos materiais

Para caracterizar o betão foram realizados ensaios de compressão à data dos ensaios das vigas, com seis cilindros. Destes ensaios foi possível obter a resistência à compressão média de 53.08 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 4.0%, e um módulo de elasticidade médio de 31.17 GPa (CoV=4.4%) de acordo com as normas NP EN 12390-3 [17] e a recomendação LNEC E397 [18], respetivamente. À data do programa experimental, as vigas de BA tinham aproximadamente dois anos de idade.

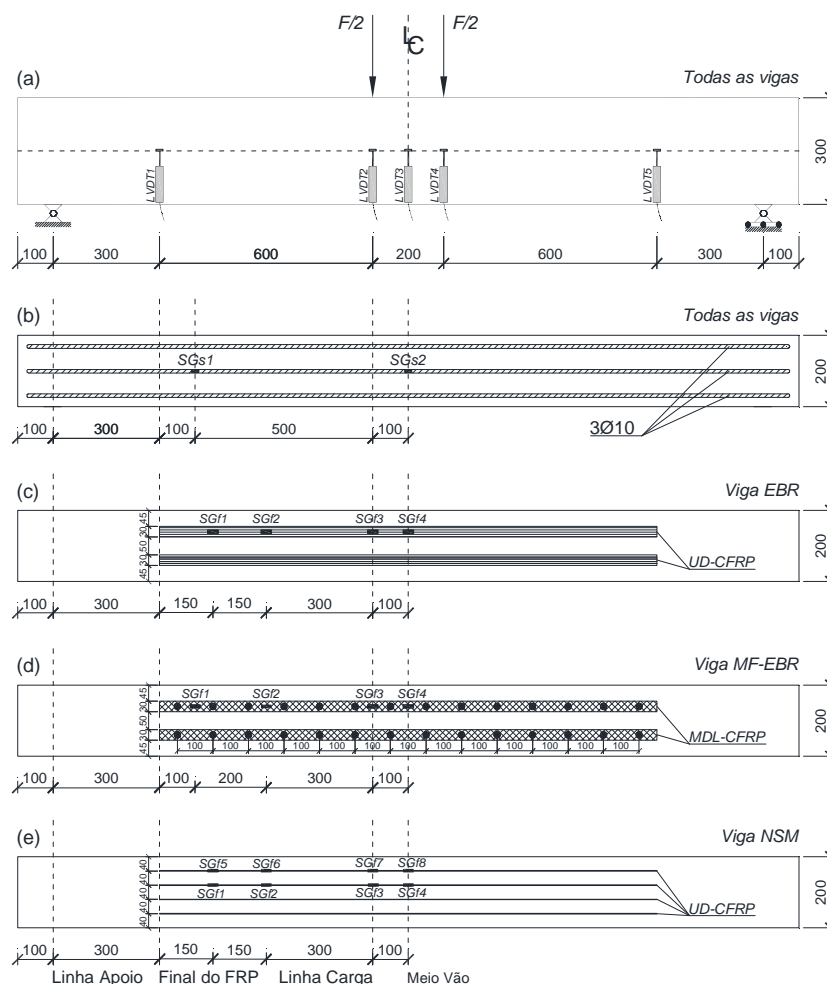


Figura 3 – Instrumentação adotada: (a) deslocamentos verticais; (b) extensões no aço; (c) extensões no laminado da viga EBR; (d) extensões no laminado da viga MF-EBR; (e) extensões no laminado da viga NSM. Nota: Todas as dimensões estão em milímetros.

O aço da armadura longitudinal e transversal tinha a designação A400 NR SD de acordo com a NP EN 1992-1-1 [19]. As principais propriedades mecânicas das armaduras são apresentadas na secção da simulação numérica. Informação adicional acerca da caracterização das armaduras pode ser encontrada noutra publicação [20]. O laminado utilizado neste trabalho era de dois tipos: unidireccional (UD-CFRP) para as vigas EBR e NSM, e multidireccional (MDL-CFRP) para as vigas MF-EBR. O MDL-CFRP foi concebido e produzido para o projeto de investigação em que este trabalho se insere, enquanto o UD-CFRP era um produto existente no mercado (S&P CFK® 150/2000). Foram realizados ensaios de tração de acordo com a ISO 527-4 [21] para caracterizar mecanicamente ambos os laminados. Desses ensaios obtiveram-se uma resistência à tração, um módulo de elasticidade e uma extensão última de 1866 MPa (CoV=5.1%), 118 GPa (CoV=2.8%) e 1.58 % (CoV=5.1%) para o MDL-CFRP, e 2435 MPa (CoV=5.8%), 158 GPa (CoV=3.9%) e 1.50 % (CoV=4.7%) para o UD-CFRP, respetivamente [16]. Para o MDL-CFRP foram ainda realizados ensaios de esmagamento segundo a ASTM D5961/D5961M-05 [22]

tendo-se obtido 316.4 MPa (CoV=11.8%) e 604.4 MPa (CoV=5.8%) de resistência ao esmagamento sem pré-esforço e com pré-esforço de aperto no parafuso equivalente a um momento de aperto de 20 N×m, respetivamente [16].

A colagem dos laminados foi realizada com *S&P Resin 220 epoxy adhesive*®. De acordo com o fornecedor, este adesivo epóxico tem uma resistência à tração em flexão, resistência à compressão e aderência betão/laminado de 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa, respetivamente.

O sistema de ancoragens utilizado nas vigas MF-EBR foi constituído por buchas químicas da Hilti® composto pela resina HIT-HY 150 max, varão roscado HIT-V M8 8.8 e anilhas de aba larga DIN9021.

2.3 Preparação dos provetes

Os vários procedimentos necessários para a preparação das vigas reforçadas são descritos nos parágrafos seguintes.

Viga EBR

Com um martelo de agulhas é criada rugosidade na superfície do betão, a qual foi posteriormente limpa com ar comprimido; os laminados foram limpos com acetona; o adesivo epóxico foi aplicado sobre a superfície do betão e na superfície do laminado que estará em contacto com este; o laminado foi então colado na superfície do betão e foi ligeiramente pressionado contra esta para criar uma espessura uniforme de adesivo de 1 a 2 mm; o adesivo epóxico em excesso foi de seguida removido.

Viga NSM

Foram abertas quatro ranhuras com 6 mm de largura e 20 mm de profundidade no betão de recobrimento, usando uma máquina de corte, para receberem o laminado; as ranhuras foram limpas com ar comprimido; os laminados foram limpos com acetona; as ranhuras foram preenchidas com adesivo epóxico; as superfícies laterais do laminado foram cobertas com uma fina camada de epóxi; os laminados foram inseridos nas ranhuras, e ligeiramente pressionados para forçar o adesivo epóxico a fluir entre o CFRP e as paredes das ranhuras; o adesivo epóxico em excesso foi removido e a superfície foi regularizada.

Viga MF-EBR

Foram efetuados furos de 11 mm de diâmetro e 100 mm de profundidade no betão de recobrimento (ver Figura 2b); os furos foram limpos com recurso a ar comprimido e escova de aço, preenchidos com o adesivo químico e, em seguida, os parafusos foram inseridos nestes até à profundidade de 100 mm; foi criada uma rugosidade na superfície do betão usando um martelo de agulhas. No final os resíduos gerados foram limpos com ar comprimido; foi usada uma placa de acrílico transparente para marcar a posição parafusos e, em seguida, foram executados os furos no laminado com recurso a um berbequim e broca corrente; os laminados foram limpos com acetona; foi aplicado adesivo epóxico sobre a área tratada na superfície do betão e na superfície do laminado que ficará em contacto com o betão; o laminado foi colocado sobre a superfície do betão e pressionado contra este para criar uma espessura uniforme de adesivo de 1 a 2 mm; o adesivo em excesso foi removido, e os parafusos foram limpos de qualquer adesivo que pudesse ter entrado em contacto com estes; após o tempo de cura do adesivo epóxico foi aplicado um momento de aperto de 40 N×m nos parafusos; no dia do ensaio o mesmo momento de aperto foi de novo aplicado de forma a ser garantido esse valor em todos os parafusos à data do ensaio.

Para todas as vigas reforçadas a preparação dos adesivos epóxico seguiu as recomendações incluídas na ficha técnica dos fabricantes. As vigas foram mantidas em ambiente de laboratório antes de serem ensaiadas.

Por último, refere-se que o critério adotado no dimensionamento das ancoragens (nível de pré-esforço e afastamento) teve como base os resultados obtidos num trabalho experimental prévio de ensaios de arrancamento direto [16].

2.4 Resultados

2.4.1 Ensaios Monotónicos

A Tabela 2 resume os principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos realizados e a Figura 4 mostra a relação entre a força e o deslocamento a meio vão ao longo dos ensaios. Nesta tabela o significado dos parâmetros aí existentes é o seguinte: δ_{cr} – flecha no início da fendilhação do betão; F_{cr} – carga no início da fendilhação do betão; δ_y – flecha na entrada em cedência da armadura longitudinal; F_y – carga correspondente à entrada em cedência da armadura longitudinal; δ_{max} – flecha na carga máxima; F_{max} – carga máxima; ε_{fu} – extensão última do laminado obtida nos ensaios de tração; ε_{fy} – extensão máxima no laminado para F_y ; ε_{fmax} – extensão máxima no laminado para F_{max} .

Tabela 2 – Principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos.

| Viga | Início fendilhação | | Cedência | | Carga Última | | δ_{max}/δ_y | $\varepsilon_{fy}/\varepsilon_{fu}$ [%] | $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$ [%] | Modo de rotura** |
|--------|-----------------------|------------------|--------------------|---------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--|--|------------------|
| | δ_{cr} [mm] | F_{cr} [kN] | δ_y [mm] | F_y [kN] | δ_{max} [mm] | F_{max} [kN] | | | | |
| REF | 0.36 | 29 | 3.8 | 70 | 22.6 | 79.3 | 5.95 | - | - | - |
| EBR | 0.27 | 25 | 4.1 | 90 | 7.4 | 108.4 (37%)* | 1.80 | 24.0 | 36.6 | D |
| MF-EBR | 0.38 | 32 | 4.2 | 96 | 18.3 | 148.2 (87%)* | 4.35 | 15.8 | 69.3 | B |
| NSM | 0.40 | 29 | 4.9 | 104 | 14.6 | 147.3 (86%)* | 2.98 | 23.4 | 63.3 | R |

* $(F_{max} - F_{max,REF})/F_{max,REF}$ em que $F_{max,REF}$ é a carga máxima da viga de referência.

** D – Descolamento; B – Esmagamento; R – Destacamento

Quando comparado com a técnica EBR, o sistema MF-EBR permitiu um aumento de capacidade de carga de cerca de 37%. Esse comportamento superior não pode ser explicado pela maior rigidez axial, $E_f A_f$, uma vez que a relação entre o $E_f A_f$ do MDL-CFRP e o $E_f A_f$ do CFK (usado na viga EBR) é apenas 1.08. As ancoragens pré-esforçadas contribuíram para a maior eficácia da técnica de reforço MF-EBR. De facto, enquanto o sistema EBR falhou por descolagem (Figura 5a), e o sistema NSM por destacamento da camada de betão de recobrimento que inclui os laminados de CFRP (*concrete cover rip-off* - Figura 5b), o sistema MF-EBR rompeu por esmagamento do MDL-CFRP (Figura 6). A presença das ancoragens evitou a descolagem prematura dos laminados, bem como o destacamento da camada de betão de recobrimento.

A partir da tabela e da figura referidas pode concluir-se que a técnica mais eficaz foi a MF-EBR, não só devido à carga máxima atingida ($F_{max}=148.2$ kN), mas também em termos de flecha na rotura e do rácio $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$, sendo este último indicador do nível de mobilização do FRP.

Definindo o nível de ductilidade como sendo o rácio entre o deslocamento (a meio vão) para a carga máxima e o deslocamento relativo à cedência das armaduras longitudinais (δ_{max}/δ_y), para a viga MF-EBR obteve-se um nível de ductilidade de 4.35 que é bastante superior ao obtido para outras vigas reforçadas, EBR (1.80) e NSM (2.98).

Aparentemente, na viga MF-EBR, a força correspondente ao início da fendilhação, F_{cr} , é maior do que nas outras vigas. Esse comportamento pode ser explicado pela existência de pré-esforço. Na verdade, a pré-tensão fornecida pelas ancoragens pode induzir um estado de compressão sobre a camada de betão que retarda o início da fendilhação. Este fenómeno também pode explicar a maior rigidez entre a iniciação da fendilhação do betão e o início da cedência do aço na viga MF-EBR. Após a cedência da armadura longitudinal, observa-se uma rigidez um pouco maior na viga NSM, quando comparada com a MF-EBR. Esse comportamento pode ser justificado pela maior eficiência da técnica NSM, uma vez que os laminados estão totalmente incorporados no betão.

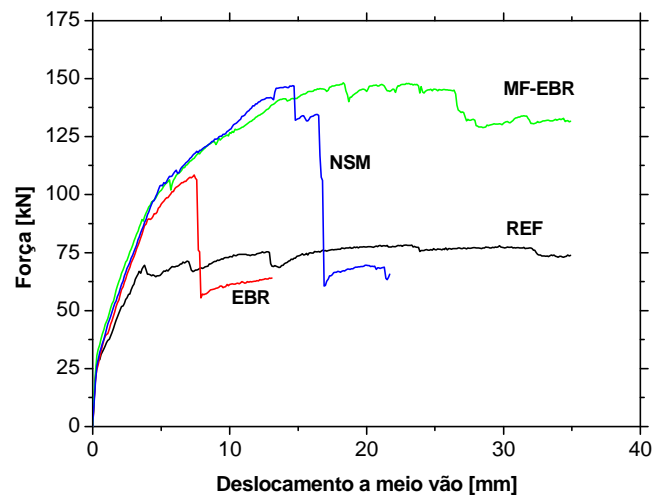


Figura 4 – Relação força vs. deslocamento nas vigas ensaiadas sob carregamento monotónico.



Figura 5 – Modo de rotura do laminado UD-CFRP: (a) Viga reforçada com a técnica EBR; (b) Viga reforçada com a técnica NSM.



Figura 6 – Modo de rotura do laminado MDL-CFRP na viga MF-EBR: (a) deflexão vertical da viga; (b) pormenor do esmagamento do laminado.

Na Figura 7(a) apresentam-se as extensões dos laminados de FRP para três níveis de carregamento distintos: início da fendilhação (CR), início da cedência das armaduras (YL) e carga máxima (UL). Neste gráfico a localização do extensómetro (SG) é feita em relação à extremidade esquerda do laminado (ver Figura 3). Tal como esperado, desde a extremidade do laminado até ao ponto de carga, a variação da extensão ao longo dos laminados cresceu quase linearmente até ao nível de carga em que ocorre a cedência das armaduras longitudinais, o que traduz a variação do momento flector aplicado. As menores extensões nos laminados da viga MF-EBR até ao início da cedência das armaduras são justificadas pela elevada concentração de extensões nas imediações dos parafusos, o que faz com que as extensões sejam muito menores na zona a meia distância entre parafusos, onde os SG foram instalados. Contudo, a presença de parafusos permitiu o desenvolvimento do maior campo de extensões no vão de corte, o que justifica a maior capacidade de carga e o maior nível de ductilidade da viga MF-EBR.

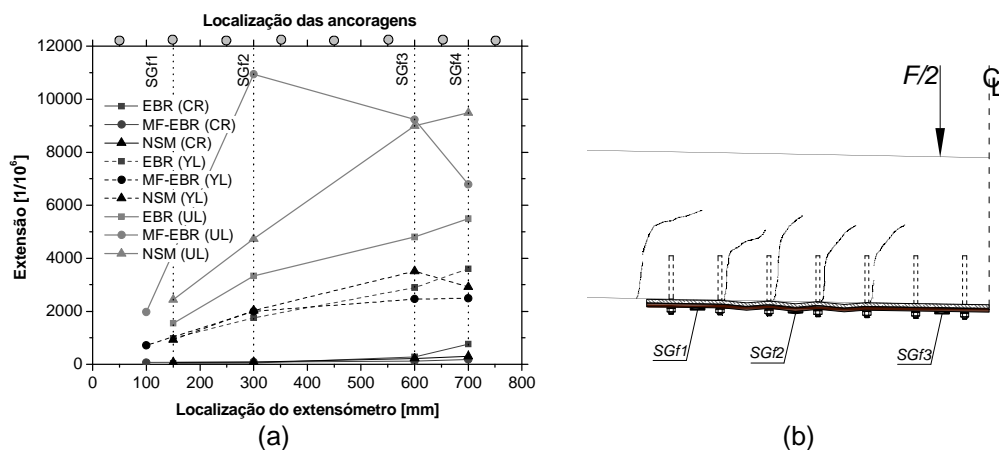


Figura 7 – (a) Variação das extensões nos laminados durante os ensaios monotónicos; (b) mecanismo de rotura para a viga MF-EBR.

Para a situação da carga máxima e na zona do vão de corte observa-se um acréscimo significativo das extensões no laminado da viga MF-EBR. Este fenómeno pode ser explicado através do esquema representado na Figura 7(b) relativo ao mecanismo de rotura ocorrido. As escoras de betão que se formam entre duas ancoragens mecânicas consecutivas, introduzem flexão no laminado a qual é responsável pelo aumento relativamente elevado da sua extensão, como é o caso da

zona onde se localiza o extensómetro SGf2. Por outro lado, dado que na zona de flexão pura não se observou este fenómeno, o nível de extensões observadas no laminado foi próximo do obtido pela técnica EBR.

Ensaaios de Fadiga

A Tabela 3 resume os principais resultados obtidos nos ensaios de fadiga. A Figura 8 mostra a relação entre a força e o deslocamento a meio vão até à rotura das vigas no carregamento monotónico que se seguiu ao milhão de ciclos realizado em cada viga. O comportamento até ao início da fendilhação foi idêntico ao observado nas vigas monotónicas. Após o carregamento de fadiga, a técnica NSM revelou-se a mais efectiva quer em termos de capacidade de carga ($F_{max}=160.7$ kN) como ao nível de ductilidade ($\delta_{max}/\delta_y=6.73$). Quando comparado com os correspondentes ensaios monotónicos, a variação de capacidade de carga para as vigas REF, EBR e MF-EBR foi marginal, enquanto na viga NSM se registou um aumento de 9%. Não existe uma explicação racional aparente para este comportamento. O desempenho inferior da viga MF-EBR, quando comparada com a monotónica respectiva, pode ser atribuída a uma possível perda de pré-esforço nas ancoragens e/ou à degradação por esmagamento do MDL-CFRP durante os ciclos de fadiga que fez com que a técnica MF-EBR perdesse eficiência para deformações mais elevadas.

As vigas EBR e NSM revelaram os mesmos modos de rotura que haviam apresentado nos ensaios monotónicos. A viga MF-EBR em fadiga apresentou um modo de rotura bem diferente do registado no ensaio monotónico, com esmagamento associado a rotura inter-laminar do MDL-CFRP. Os sucessivos ciclos de fadiga poderão ter contribuído de forma decisiva para a deterioração das interfaces das diferentes camadas que constituem este laminado multidireccional.

Tabela 3 – Principais resultados obtidos nos ensaios de fadiga.

| Viga | Início fendilhação | | Cedência | | Carga Última | | δ_{max}/δ_y | $\epsilon_{fy}/\epsilon_{fu}$ [%] | $\epsilon_{fmax}/\epsilon_{fu}$ [%] | Modo de rotura** |
|--------|-----------------------|------------------|--------------------|---------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|------------------|
| | δ_{cr} [mm] | F_{cr} [kN] | δ_y [mm] | F_y [kN] | δ_{max} [mm] | F_{max} [kN] | | | | |
| REF | 0.26 | 20 | 2.5 | 66 | 23.3 | 79.9 | 9.32 | - | - | - |
| EBR | 0.32 | 27 | 3.0 | 94 | 7.1 | 114.2 (43%)* | 2.37 | 14.6 | 29.6 | P |
| MF-EBR | 0.35 | 31 | 3.7 | 101 | 12.9 | 147.2 (84%)* | 3.49 | 15.0 | 63.4 | E |
| NSM | N/A | N/A | 3.3 | 105 | 22.2 | 160.7 (101%)* | 6.73 | 15.4 | 55.7 | R |

* $(F_{max} - F_{max,REF})/F_{max,REF}$ em que $F_{max,REF}$ é a carga máxima da viga de referência.

** P – Descolamento; B – Esmagamento; R - Destacamento

A Figura 9 apresenta a variação do deslocamento mínimo e máximo a meio vão devida aos níveis de carga mínimo e máximo, respetivamente, aplicados durante os ensaios de fadiga. A variação é quase marginal, verificando-se um decréscimo de 8.3%, 3.0%, 0.3% e 12.1% em termos de rigidez, para as vigas REF, EBR, MF-EBR e NSM, respetivamente.

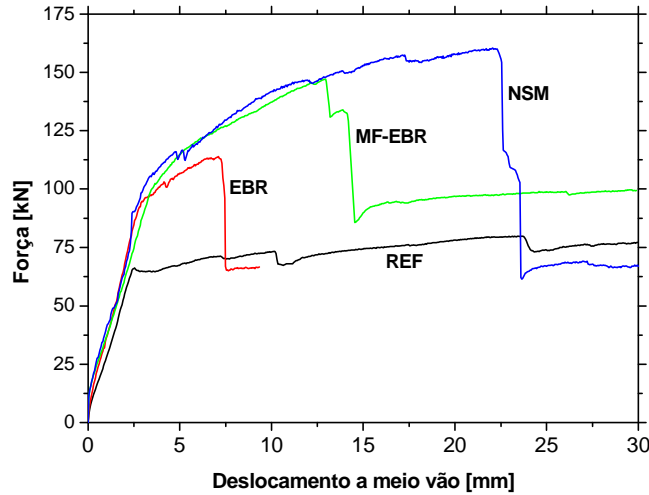


Figura 8 – Relação força vs. deslocamento nas vigas após a realização dos ciclos de fadiga.

2.4 Simulação numérica

Os ensaios monotónicos foram simulados numericamente com o intuito de aferir a capacidade das actuais ferramentas, suportadas no método dos elementos finitos (MEF), em simular vigas de BA reforçadas segundo as três técnicas em análise. São abordados alguns aspetos tais como o início da fendilhação, degradação da rigidez, início de cedência das armaduras, capacidade de carga e padrão de fendilhação. Todas as simulações foram realizadas com o código computacional FEMIX [23]. As vigas foram modeladas em estado plano de tensão. Como exemplo, na Figura 10 apresenta-se a geometria, a malha de elementos finitos, a configuração de carregamento e as condições de apoio para a viga MF-EBR. Para a simulação dos elementos de betão foram utilizados elementos de Serendipity de quatro nós em estado plano de tensão com 2×2 pontos de integração de Gauss-Legendre. Foi adoptado um modelo elasto-plástico de fissuração multi-fixa distribuída para simular o comportamento não linear do betão [24]. Foram utilizadas duas superfícies de cedência diferentes: o critério de Rankine para o betão à tração e a de Owen & Figueiras [25] para o betão em compressão. Foi adotada uma lei de endurecimento isotrópica no modelo elasto-plástico com uma lei de escoamento do tipo *strain hardening*. O diagrama endurecimento/amolecimento adoptado pode ser consultado noutra publicação [24]. A evolução da fendilhação do modo I de fractura foi simulada utilizando o diagrama de amolecimento em tração de Cornellsen [26]. As propriedades utilizadas para o betão foram as seguintes: peso específico, $\rho=25 \text{ kN/m}^3$; coeficiente de Poisson, $\nu_c=0.2$; módulo de Young inicial, $E_c=31.17 \text{ GPa}$; resistência à compressão, $f_c=53.08 \text{ MPa}$; resistência à tração, $f_{ct}=2.9 \text{ MPa}$; energia de fractura, $G_c=0.09 \text{ N/mm}$; largura da zona de fenda, $l_f=\text{raiz quadrada da área do ponto de integração (PI)}$; ângulo limite para abertura de nova fenda, $\alpha=89^\circ$; máximo número de fendas por PI, $n_{cf}=2$.

As armaduras longitudinais e transversais e os FRP's foram simulados com elementos de cabo linear de dois nós com dois pontos de integração de Gauss-Legendre. Foi admitida aderência perfeita entre o aço e o betão. A lei do aço foi admitida como bi-linear até à rotura. No caso do laminado unidireccional utilizado nas

vigas EBR e NSM foi admitida uma lei linear até à resistência máxima deste. No caso da viga MF-EBR foi adotada uma lei bi-linear para o MDL-CFRP. Na Tabela 4 incluem-se os parâmetros definidos das leis materiais adotadas para o aço e os CFRP's.

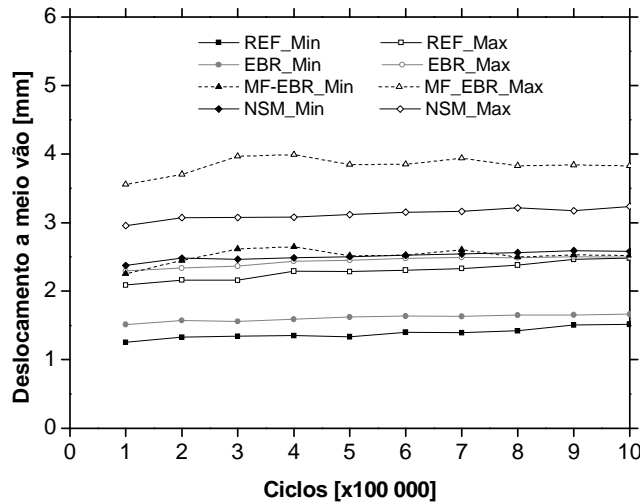


Figura 9 – Variação da deflexão a meio vão durante os ciclos de fadiga.

Salienta-se o facto de todos os valores adoptados para definir as propriedades dos materiais terem sido estimados com base nos ensaios experimentais realizados para a sua caracterização.

Na viga NSM foi admitida aderência perfeita entre o betão e o UD-CFRP, enquanto nas vigas EBR e MF-EBR o escorregamento do FRP foi permitido. Para modelar o escorregamento do FRP em contacto com o betão nessas vigas foram utilizados elementos de interface de quatro nós com dois pontos de integração de Gauss-Lobatto. A relação tensão tangencial *versus* escorregamento (τ - s) adotada para simular o comportamento não linear da interface foi a seguinte:

$$\tau(s) = \left\{ \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha \text{ se } s \leq s_m; \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^{\alpha'} \text{ se } s > s_m \right\} \quad (2)$$

onde τ_m e s_m são a tensão máxima de aderência e o correspondente deslizamento, respetivamente; α e α' definem a forma da curva τ - s nas fases de pré e pós-pico, respetivamente. Admitindo que a rigidez normal da interface tem pouca influência no comportamento da ligação, esta foi considerada com valor constante de 10^7 N/mm³.

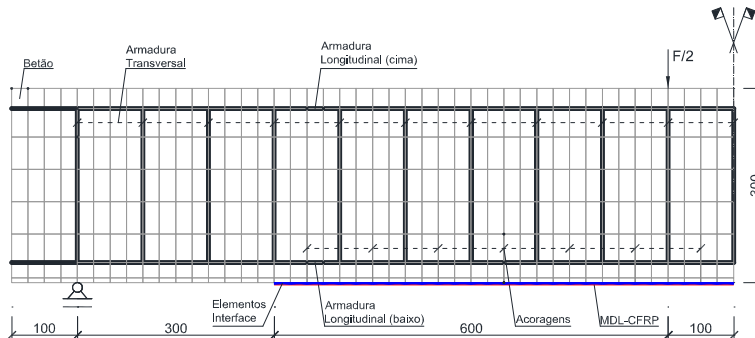


Figura 10 – Geometria, malha de elementos finitos, carregamento e condições de apoio para a viga MF-EBR. Nota: Todas as dimensões estão em milímetros.

Tabela 4 – Propriedades adotadas para a simulação do aço, do UD-CFRP e do MDL-CFRP.

| Material | ε_{p1} [1/1000] | σ_{p1} [MPa] | ε_{p2} [1/1000] | σ_{p2} [MPa] |
|----------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Ø6 | 2.36 | 452.0 | 135.75 | 475.00 |
| Ø10 | 2.53 | 455.0 | 160.00 | 475.00 |
| UD-CFRP | 15.00 | 2434.6 | - | - |
| MDL-CFRP | 3.30 | 390.0 | 20.00 | 850.00 |

Nota: lei bi-linear definida pelos pontos $(\varepsilon_{p1}, \sigma_{p1})$ e $(\varepsilon_{p2}, \sigma_{p2})$. ε_{p1} =extensão no final do primeiro tramo; σ_{p1} =tensão no final do primeiro tramo; ε_{p2} =extensão no final do último tramo; σ_{p2} =tensão no final do último tramo.

O valor de τ_m foi obtido com base na ficha técnica do adesivo utilizado, enquanto os restantes parâmetros foram ajustados de modo a que a resposta numérica fosse a mais próximo possível da obtida experimentalmente. Assim, foram adoptados valores de $\tau_m=3.0$ MPa, $s_m=0.17$ mm, $\alpha=0.9$ e $\alpha'=2.0$ para a simulação da viga EBR e $\tau_m=3.0$ MPa, $s_m=0.05$ mm, $\alpha=0.9$ e $\alpha'=10.0$ para a simulação da viga MF-EBR. A simulação das ancoragens nesta última foi realizada com recurso a elementos de barra 2D em regime linear elástico com aderência perfeita ao betão. Para simular o pré-esforço aplicado nas ancoragens (40 N×m de momento de aperto) foi aplicada nestes elementos uma variação uniforme de temperatura de -146°C.

Na Figura 11a apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento a meio vão obtidas experimental e numericamente para as vigas REF, EBR e MF-EBR. Da análise destas curvas pode afirmar-se que os pontos notáveis dos ensaios experimentais foram bem captados pelo modelo numérico, nomeadamente, o início de fendilhação, o início da cedência e a carga máxima.

No caso da viga NSM foram realizadas duas simulações distintas, uma vez que a rotura desta foi ao nível do betão de recobrimento e inclui os laminados de UD-CFRP. Na primeira simulação (Num.1) as propriedades do betão foram assumidas iguais para todos os elementos enquanto na segunda simulação (Num.2) as propriedades mecânicas do betão situado entre a armadura longitudinal inferior e o laminado foram reduzidas para simular numericamente o destacamento do betão de recobrimento. Conforme se pode constatar pela análise da Figura 11b, a simulação Num.1 consegue melhor captar o comportamento inicial do ensaio (até à entrada em cedência das armaduras), enquanto a simulação Num.2 quase consegue estimar a carga máxima obtida.

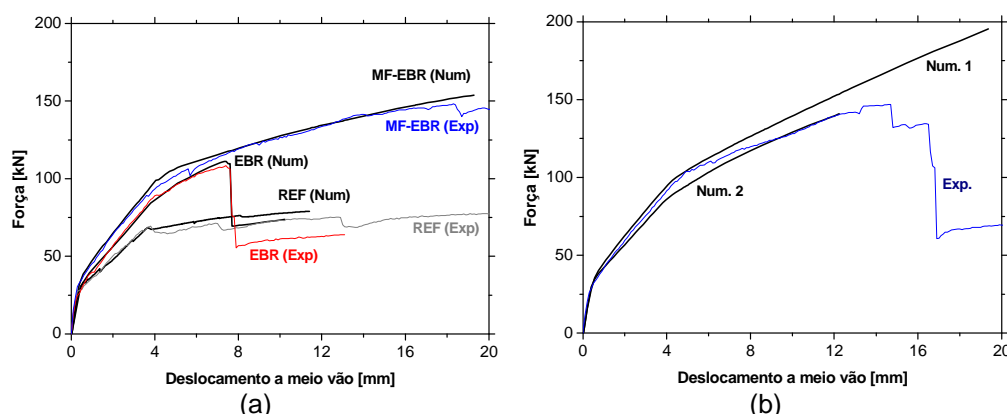


Figura 11 – Comparação entre as curvas força vs. deslocamento obtidas experimentalmente e numericamente das vigas: (a) REF, EBR e MF-EBR; (b) NSM.

Na Figura 12 apresentam-se os padrões de fendilhação obtidos numericamente. No caso das vigas REF, EBR e MF-EBR observa-se uma boa concordância entre o padrão de fendilhação numérico e experimental, aumentando em número e intensidade de fendas da viga REF até à viga MF-EBR. No que respeita à viga NSM ambas as simulações não conseguem prever o padrão de fendilhação observado experimentalmente apesar de na simulação Num.2 se observar uma maior concentração de fendas na zona onde ocorreu o destacamento.

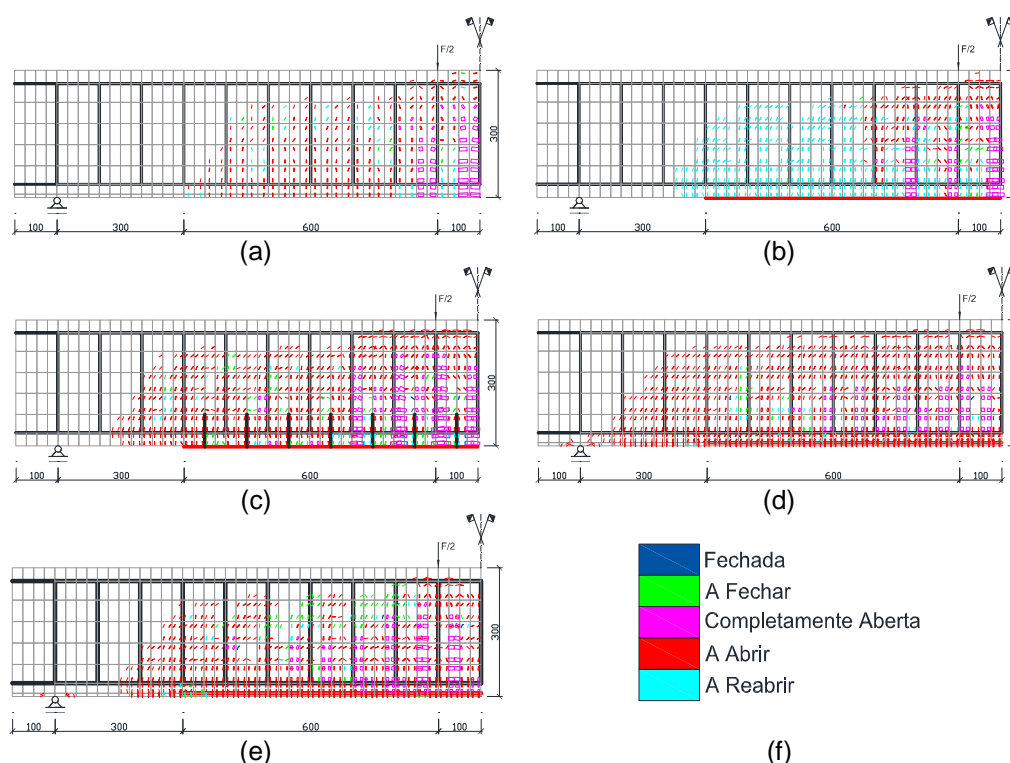


Figura 12 – Padrões de fendilhação para a viga: (a) REF, (b) EBR, (c) MF-EBR, (d) NSM-1 e (e) NSM-2; (f) Estatuto da fenda.

3 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma técnica de reforço à flexão designada por MF-EBR – *Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*. Esta técnica combina os benefícios derivados da aplicação de ancoragens usadas na técnica MF-FRP com os intrínsecos à ligação colada segundo a técnica EBR. Além disso, todas as ancoragens são pré-esforçadas. Esta técnica utiliza laminados multidireccionais produzidos exclusivamente com polímeros reforçados com fibras de carbono, desenvolvidos no âmbito do projeto em que este trabalho se insere. Para avaliar a eficiência das técnicas de reforço EBR, MF-EBR e NSM, foi realizado um programa experimental composto por duas séries de quatro vigas cada, uma submetida a carregamento monotónico e outra a carregamento de fadiga. Foi adotada uma configuração de quatro pontos de carga em ambas as séries. Os ensaios de fadiga foram efetuados com um milhão de ciclos a uma frequência de 2 Hz. Cada série é composta por uma viga de referência (REF) e outras três reforçadas de acordo com cada uma das três técnicas de reforço em estudo: EBR, MF-EBR e NSM.

Em termos de ensaios monotónicos, quando comparado com a viga de referência, foi obtido um aumento na capacidade de carga de 37%, 87% e 86%, para as vigas EBR, MF-EBR e NSM, respetivamente. Quando comparado com a viga EBR, foi obtido um aumento na capacidade de carga de 37% para a técnica MF-EBR. No entanto, o aspeto mais favorável da técnica MF-EBR foi o nível de ductilidade (4.35), que foi muito superior ao registado nas outras duas vigas reforçadas, EBR (1.80) e NSM (2.98).

Nos ensaios de fadiga, após 1 milhão de ciclos, a viga NSM apresentou a maior capacidade de carga (aumento de 101%) enquanto as vigas MF-EBR e EBR apresentaram aumentos de apenas 84% e 43%, respetivamente, quando comparados com a máxima carga obtida na viga de referência em fadiga. Também em termos de deformação normalizada para a carga máxima (nível de ductilidade), a viga NSM apresentou o maior valor (6.7) comparativamente aos 3.5 e 2.4 das vigas MF-EBR e EBR, respetivamente.

Apesar dos presentes resultados serem credíveis, contribuindo assim para o conhecimento nesta área, é necessária mais investigação para a melhor compreensão dos fenómenos observados.

As simulações numéricas dos ensaios monotónicos demonstraram que as actuais ferramentas de MEF conseguem simular com boa precisão os principais aspetos fundamentais observados experimentalmente, nomeadamente, o início de fendilhação, a degradação da rigidez, o início da cedência das armaduras, a carga máxima e o padrão de fendilhação.

4 Agradecimentos

O presente trabalho foi financiado pelos programas COMPETE e FEDER, projeto PTDC/ECM/74337/2006 da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais, nomeadamente, à *Hilti Portugal – Produtos e Serviços Lda.*, à *S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda.* e à SECIL, e à empresa *TSwaterjet* pelo corte dos laminados utilizando a tecnologia de jato de água.

5 Referências

- [1] American Concrete Institute (ACI) – "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures." *Report ACI 440.2R-08 by ACI Committee 440*, 2008, Farmington Hills, USA, 80 pp.
- [2] De Lorenzis, L.; Teng, J. G. – "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures." *Composites: Part B*, 2007, 38, 119-143.
- [3] Bank, L.; Arora, D. – "Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips", *Composite Structures*, 2007, 79, p. 180–191.
- [4] Elsayed *et al.* – "Studies on mechanically fastened fiber-reinforced polymer strengthening systems." *ACI Structural Journal*, 2009, 106(1), 49-59.
- [5] Micelli *et al.* – "Anchorage of composite laminates in RC flexural beams." *Journal of Structural Concrete*, 2010, 11(3), 117 –126.
- [6] Martin, J.A.; Lamanna, A.J. – "Performance of mechanically fastened FRP strengthened concrete beams in flexure." *Journal of Composites for Construction*, 2008, 12(3), 257-265.

- [7] Elsayed *et al.* – "Mechanically fastened FRP-strengthened two-way concrete slabs with and without cutouts." *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(3), 198-207.
- [8] Lee *et al.* – "Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip." *Journal of Cement & Concrete Composites*, 2009, 31, 496–504.
- [9] Aidoo *et al.* – "Full-scale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials." *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(3), 350-358.
- [10] Dempsey, D.D.; Scott, D.W. – "Wood members strengthened with mechanically fastened FRP strips." *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(5), 392-398.
- [11] Ekenel *et al.* – "Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabric and precured laminate systems." *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(5), 433-442.
- [12] Quattlebaum *et al.* – "Comparison of three flexural retrofit systems under monotonic and fatigue loads." *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(6), 731-740.
- [13] Lamanna *et al.* – "Flexural strengthening of reinforced concrete beams using fasteners and fiber-reinforced polymer strips." *ACI Structural Journal*, 2001, 98(3), 368-376.
- [14] Lamanna *et al.* – "Flexural strengthening of reinforced concrete beams by mechanically attaching fiber-reinforced polymer strips." *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(3), 204-209.
- [15] Ray *et al.* – "Flexural behavior of reinforced concrete members strengthened using mechanically fastened fiber reinforced polymer plates." *Proc. 22nd Army Science Conf.*, 2000, The United States Army, Washington, D.C., 556–560.
- [16] Sena-Cruz *et al.* – "Bond between concrete and multi-directional CFRP laminates." *Advanced Materials Research*, 2010, Vols. 133-134, 917-922.
- [17] NP EN 12390-3 – "Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens." *CEN*, 2009, Brussels.
- [18] LNEC E397-1993 – "Betão – Determinação do módulo de elasticidade em compressão." *LNEC*, 1993.
- [19] NP EN 1992-1-1 – "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings." *CEN*, 2010, Brussels.
- [20] Bonaldo, E. – "Materiais compósitos e fibras discretas de aço no reforço de estruturas laminares de betão." Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Setembro 2008, 404 pp.
- [21] ISO 527-4 – "Plastics - Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites." *International Organization for Standardization (ISO)*, 1997, Genève, Switzerland.
- [22] ASTM D 5961/D 5961M-05 – "Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates." *ASTM International*, 2005, West Conshohocken, PA.
- [23] Sena-Cruz *et al.* – "Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips." *CNME 2007 - Congress on Numerical Methods in Engineering e XXVIII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Paper no. 485, 2007, FEUP, Porto, 20 pp.
- [24] Sena-Cruz, J.M. – "Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips." Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004, 216 pp.

Coelho, M.; Silva, L.; **Sena-Cruz, J.M.**; Barros, J. (2011) "Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga." *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*.

- [25] Owen, D.R.J., Figueiras, J.A. – "Anisotropic elasto-plastic finite element analysis of thick and thin plates and shells." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1983, 19, 323-350.
- [26] Cornelissen, H.A.W. et al. – "Experimental determination of crack softening characteristics of normal and lightweight concrete." *HERON, Fracture Mechanics and Structural Aspects of Concrete*, 1986, 31(2), 45-56.